

基于侧抑制频谱调谐的显著性检测方法

李崇飞¹ 曲智国² 卢凯¹ 高颖慧²

(国防科技大学计算机学院 长沙 410073)¹ (国防科技大学 ATR 国家重点实验室 长沙 410073)²

摘要 传统的基于频域的显著性检测方法存在处理结果不稳定以及缺少仿生学意义等问题。根据人眼识别的侧抑制机制,提出了一种频域调谐的显著性检测方法。该方法通过对图像傅里叶频谱进行多种非线性自适应调谐,达到抑制图像中冗余特征及增强显著特征的效果,进而实现图像显著区域的有效检测。通过对自然图像和心理物理学模板图像的对比实验和分析表明,该方法在显著区域检测率、显著区域轮廓完整性及显著区域对比度等方面,都比现有显著性检测方法有较大提高。

关键词 显著区域,侧抑制,频谱分析,非线性调谐

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Saliency Detection Method Based on Spectrum Tuning Using Lateral Inhibition

LI Chong-fei¹ QU Zhi-guo² LU Kai¹ GAO Ying-hui²

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)¹

(ATR National Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)²

Abstract The traditional spectral-based saliency detection methods have many drawbacks, such as unstable detection result and lack of bionics meaning. This paper presented a new saliency detection method based on spectrum tuning using lateral inhibition mechanism. The new method tunes the Fourier spectral self-adaptively using multiple nonlinear tune forms to inhibit the redundant image features and enhance the saliency image features, and therefore the salient region could be detected effectively. We tested this method on both real natural images and artificial pictures such as psychological patterns. The results indicate that our method is more efficient than other methods in aspects of saliency region detection rate, salient region contour detection and high salient region contrast.

Keywords Salient region, Lateral inhibition, Frequency domain analysis, Nonlinear tuning

1 引言

随着传感器技术和成像技术的飞速发展,图像数据的规模和复杂程度不断加大,对后续的图像处理和目标分析带来了很大难度。如何减少处理数据量和提高分析准确性成为当前海量复杂图像处理的一个难点。近年来,以视觉注意为代表^[3]的图像显著性区域检测技术成为提高海量数据筛选实时性和分析准确性的重要技术途径之一。

显著性区域检测算法^[3-6]总体上可以分成基于空域的显著性检测算法和基于频域的显著性检测算法两类。基于空域的显著性检测算法出现较早。最早是由 Treisman 和 Gelade 提出的特征综合理论^[1],该理论将视觉注意过程分为早期视觉信息的并行处理和后期视觉特征的串行融合。Koeh 和 Ullman 对特征综合理论进行了扩展^[2],研究了视觉注意的焦点选择和转移机制,并提出了显著图概念。在这些研究基础上,Itti 提出了自底向上的视觉注意算法^[3],该算法通过提取图像的多特征多尺度信息进行显著性度量,并通过 Center-Surround 算子对结果进行融合得到显著图。虽然 Itti 的视觉注意方法符合仿生学机理,但它仍存在对参数选择敏感及计

算复杂度高等不足,大大限制了其在实时系统中的应用。

为了提高算法实时性,研究人员将频域信息引入显著性检测方法,提出了一些基于频域的显著性检测方法。Hou 和 Zhang 提出了频域谱残余方法^[4],该方法通过处理幅度谱得到残余谱,再利用傅里叶逆变换得到空域显著图。Guo 等人也提出了一种频域显著性计算方法^[5],该方法对图像进行傅里叶变换后直接丢弃幅度谱信息,再取相位谱的逆变换得到显著图。Yu 等人提出了基于脉冲余弦变换的显著性检测方法^[6],该方法以脉冲余弦变换对图像显著性进行二元编码,进而得到显著图。基于频域的显著性检测算法具有计算速度快的优点,因此成为了图像显著性区域检测技术中的研究热点。但现有算法也存在以下不足:1)对于面积较小的显著区域的提取效果较差;2)所提取的显著区域特征不完整,一般无法提取完整形状;3)处理结果的稳定性较差。

针对已有的基于频域的显著性区域检测方法的不足,基于人眼显著性识别的侧抑制机制,本文提出了一种新的基于频域的显著性区域检测方法。该方法通过对图像傅里叶频谱进行非线性自适应调谐,达到抑制图像中冗余特征频谱及增强显著特征频谱的效果,进而实现对显著区域的有效检测。

到稿日期:2011-05-11 返修日期:2011-07-20 本文受国防预研基金项目(9140A01010309KG01),自然科学基金项目(61003075)资助。

李崇飞(1986-),男,硕士生,主要研究方向为图像处理、并行信号处理,E-mail:lichongfei2000@163.com;卢凯 研究员。

实验结果表明,本文方法较已有的基于频域的显著性检测方法的检测效果有较大提升,同时还能有效指示显著区域的形状。

2 基于频域调谐的显著性检测方法

2.1 频域残余谱检测方法

残余谱方法^[4]是最具代表性的基于频域的显著性区域检测方法。

根据信息论观点,图像 $H(\text{image})$ 包含的信息可以分为两部分^[4],一部分是新颖的反常信息 $H(\text{innovation})$,另外一部分是冗余的常见信息 $H(\text{redundancy})$ 。

$$H(\text{image}) = H(\text{innovation}) + H(\text{redundancy}) \quad (1)$$

新颖的反常信息 $H(\text{innovation})$ 就是图像的显著性信息,可以通过下式求得:

$$H(\text{innovation}) = H(\text{image}) - H(\text{redundancy}) \quad (2)$$

根据文献^[4]的理论,自然图像具有统计特性变换不变性,同时大多数自然图像在幅度谱上服从 $1/f$ 规则^[11],即某频率的幅值与该频率的倒数成正比,故其 \log 频谱与频率近似呈线性关系。在 \log 谱上做运算,利用平均滤波器与幅度谱进行卷积得到冗余数据。设输入图像为 I ,傅里叶变换为 $F(\cdot)$,其 \log 频谱如式(3)所示。

$$f = \log(F(I)) \quad (3)$$

由于 \log 频谱的近似线性,用式(4)所示的平均滤波器与 \log 频谱进行卷积得到冗余信息的频谱。图像信息与冗余信息的 \log 幅度谱的差值就是输入图像的残余谱,也就是新颖信息。具体如式(5)所示。

$$h_n = \frac{1}{n^2} \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$f' = f - f * h_n \quad (5)$$

设 p 为图像的相位谱,则显著图 S 可通过式(6)求得:

$$S = G * |F^{-1}[\exp(f' + p)]|^2 \quad (6)$$

式中, G 代表高斯平滑滤波器, $F^{-1}(\cdot)$ 代表傅里叶逆变换。

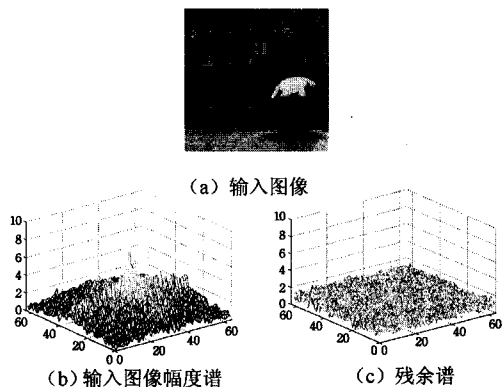


图1 残余谱频谱效果图

图1给出了残余谱方法的频谱图。根据文献^[4,11]的理论可知,图1(b)中的峰值代表了图像中的冗余特征。该峰值越高,表示图像的冗余特征越多。计算残余谱,如图1(c)所示,消除频域的峰值,即消除了图像中的冗余特征,进而得到图像中的显著特征。但残余谱算法存在以下不足:首先,该方法对整幅频域图像进行归一化处理,在抑制图像冗余特征频谱的同时也部分抑制了显著特征频谱,从而降低了显著区域

的对比度;其次,该方法仿生学意义不明显,对于某些特定图像,例如心理物理学模板,由于不符合 $1/f$ 规则,其处理效果不理想。因此,本文通过分析图像的频域幅度谱特征,基于人眼显著性识别的侧抑制机制,提出了一种基于非线性频域调谐的显著性区域检测方法。

2.2 侧抑制机制与频谱调谐

人的初级视觉通道有两种重要的特征提取细胞:神经节细胞和 $V1$ 区简单细胞。研究表明,人类自底向上的显著图形成于 $V1$ 区细胞^[7]。进入我们眼睛的图像信息通过视网膜的光感受器进入视觉通道,光感受器的信号通过神经节细胞转换为发放率。每一个 $V1$ 区简单细胞连接着初级的神经节细胞,同时连接着周边其它的 $V1$ 区简单细胞^[8]。这种横向连接具有一种称为侧抑制的重要特性。该特性可以简单描述为:当一个与周围明显不同的视觉特征被 $V1$ 区细胞检测到时,因该特征没有受到周围同类细胞的抑制,其发放率较高;当一个与周围相同的视觉特征被 $V1$ 区细胞检测到时,因该特征受到周围同类细胞的抑制,其发放率大大降低。故高发射率的 $V1$ 区细胞总出现在视觉特征突出的位置^[6],视觉特征越稀有,其细胞发放率越高,视觉特征越常见,其发放率越低。

根据人类视觉的侧抑制机制对图像进行处理时,需对冗余特征分量进行抑制,对稀有特征进行增强。傅里叶变换把图像转换为一系列不同幅值的复数基波的加权和,这些复数基波的系数代表原图中不同频率和方向特征的统计值^[6],其中幅度谱代表了不同特征分量在图像信息中所占的比重。如果改变幅度谱的值,就改变了原图像中各特征分量的比重值。

本文提出的用图像傅里叶幅度谱进行自适应调谐的方法与人类视觉的侧抑制机制极其相似。该调谐方法可以简单描述如下:较大的幅度谱系数值代表原图像中出现较多的特征,对其进行削弱或抑制;较小的幅度谱系数值代表原图像中的稀有特征,也就是显著性特征,对其进行自适应增强。然后对调谐后的傅里叶幅度谱进行逆变换,得到显著区域突出的显著图。

2.3 基于频谱调谐的显著性检测方法

设输入图像为 I ,则显著图计算步骤如下:

$$f = F(I) \quad (7)$$

$$f' = A(f) \quad (8)$$

$$I' = \text{abs}(F^{-1}(f')) \quad (9)$$

$$S = G * (I')^2 \quad (10)$$

式中, $F(\cdot)$ 和 $F^{-1}(\cdot)$ 分别代表二维傅里叶变换及逆变换, $A(\cdot)$ 表示频谱调谐函数, $\text{abs}(\cdot)$ 为绝对值函数。 G 为二维高斯低通滤波器,利用其对结果进行平滑处理,增强视觉效果。 S 即为求得的显著图。

式(8)表示对频谱的自适应调谐过程,本文提出了4种非线性的频谱调谐方法。

3 频谱调谐方法与分析

人类视觉的侧抑制机制要求对冗余特征进行抑制,对稀有特征进行增强。在频域内,就是对幅度谱较大的特征进行削弱,对幅度谱较小的特征进行增强。本文设计了4种满足这种要求的频谱调谐方法,分别为指数联合调谐方法、指数分段调谐方法、多项式联合调谐方法、多项式分段调谐方法。图

2 是两种非线性调谐函数的示例。

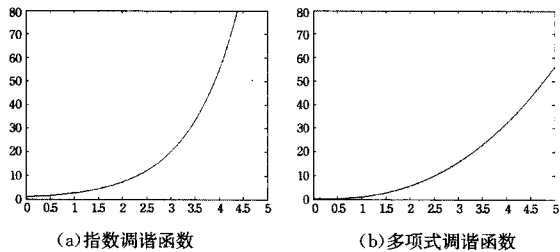


图 2 调谐函数示例

3.1 指数联合调谐

利用指数函数的非线性特征,可以构造如下调谐函数:

$$A(f) = f / (\exp(\text{abs}(f)^\alpha / \beta)) \quad (11)$$

式中, α 和 β 是调谐参数,需要根据图像类型的不同进行设置。当自变量较小时,指数函数对自变量的调整是微弱的;当自变量较大时,指数函数对自变量的调整是剧烈的。利用指数函数的这种非线性调整的特点,可以实现剧烈压制较大幅度谱值的工作,进而达到强烈抑制图像中冗余特征的目的;同时只微弱改变较小幅度谱值,达到保留稀有特征的目的。

不同种类的图像其频谱特征是有差别的。自然图像的幅度谱分布较分散,对其调谐时保护显著特征是关键。为了不过分削弱显著特征,需要采取较“温和”的调谐方式,因此调谐参数 α 需取较小值,而 β 需取较大值。另外一类常见的用来测试和评价显著性算法性能的图片是心理物理学模板^[1,9]。这类图像的幅度谱分布比较集中,中心处幅度谱值较突出,同时其稀有特征(显著性特征)比较单一。因此可以采取“激烈”的方式对较大的幅度谱值进行压制,此时调谐参数 α 需要取较大值,而 β 需要取较小值。

3.2 指数分段调谐

指数联合调谐是在尽量保护稀有特征幅度谱值的前提下削弱冗余特征幅度谱值,还无法达到突出稀有特征和过滤冗余特征的要求,因此我们又提出了分段调谐的方法。分段调谐方法利用阈值将图像幅度谱值分成两类:幅值大的幅度谱属于冗余特征类,对其进行削弱;幅值小的幅度谱属于稀有特征类,对其进行增强。分段调谐方法具体如下:

$$\Delta = \gamma * \text{average}(\text{abs}(f)) \quad (12)$$

$$A(f) = f * (\exp((\Delta - \text{abs}(f))^\alpha / \beta)) \quad (13)$$

式(12)计算图像幅度谱值的分类阈值,其中 $\text{average}(\cdot)$ 用来计算幅度谱值的平均值, γ 是阈值调整参数, Δ 代表分类阈值。利用阈值和指数函数的非线性特性,通过调整参数 α 、 β 、 γ 实现幅度谱的分段调谐。

3.3 多项式联合和分段调谐

指数调谐方法对参数选择比较敏感,不同种类图像的处理参数差别很大。针对此问题,本文提出了多项式联合和分段调谐方法。该方法将前两种调谐思想结合起来,形成了新的调谐函数。

多项式联合调谐函数如式(14)所示:

$$A(f) = f / (\text{abs}(f)^\alpha) \quad (14)$$

多项式分段调谐函数如式(16)所示:

$$\Delta = \gamma * \text{average}(\text{abs}(f)) \quad (15)$$

$$A(f(i,j)) = \begin{cases} f(x,y) / ((\text{abs}(f(i,j)) - \Delta)^\alpha), & \text{if } \text{abs}(f(i,j)) > \Delta \\ f(x,y) * ((\Delta - \text{abs}(f(i,j)))^\beta), & \text{if } \text{abs}(f(i,j)) \leq \Delta \end{cases} \quad (16)$$

多项式调谐的思想与指数调谐基本相同,利用多项式函数对幅度谱进行差异化自适应调整。联合调谐对低幅值和高幅值频谱都有压制,只是由于程度的不同导致了稀有特征的突出。分段调谐方法通过阈值强烈衰减高幅值,增强低幅值,进而改变原有幅值分布。

3.4 调谐效果分析

为了分析本文提出的 4 种非线性频谱调谐方法的效果,以下分别对自然图像和心理物理学模板图像进行处理,处理结果如图 3 和图 4 所示。

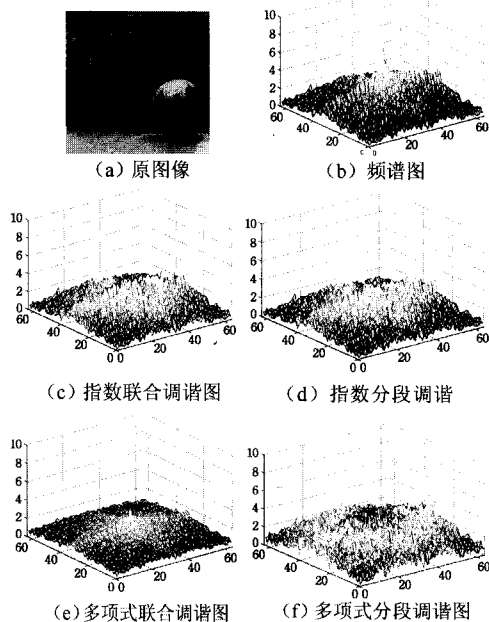


图 3 自然图像 log 幅度谱调谐效果图

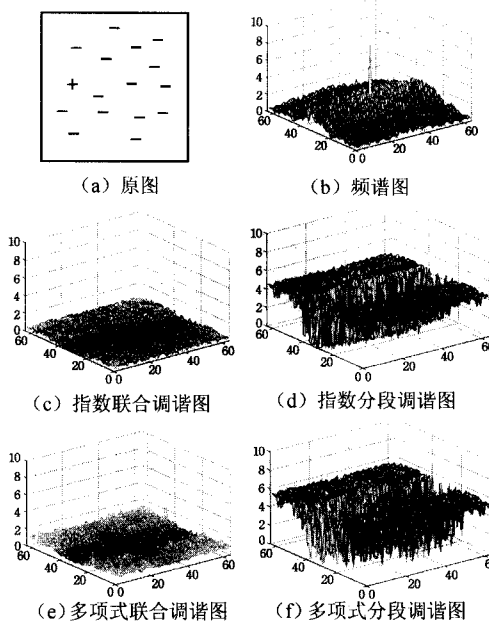


图 4 心理物理学模板图像 log 幅度谱调谐效果图

图 3 中,图(a)为输入图像,图(b)为原图像的亚采样灰度图的 log 幅度谱图像,图中心较大值代表冗余特征的幅度谱值。同样,图 4 中图(a)为输入图像,图(b)为原图像的亚采样灰度图的 log 幅度谱图像。

采用指数联合调谐方法对自然图像和心理物理学模板图

像频谱进行调谐的效果分别如图 3(c)和图 4(c)所示。图 3(c)中的极值点与周围的幅度谱差距已经被缩小。图 4(c)的中心部分受到强烈调谐,近似为 0,仅保留了稀有特征幅度谱值,因此可以得到性能较好的显著图。

采用指数分段调谐方法对自然图像和心理物理学模板图像频谱进行调谐的结果分别如图 3(d)和图 4(d)所示。与指数联合调谐类似,对自然图像采取较“温和”的方式进行调谐,对心理物理学模板采取较“激烈”的方式进行调谐。由于自然图像的阈值较高,因此指数分段调谐的结果与指数联合调谐的结果很类似。而心理物理学模板图像的阈值相对较低,高幅值和低幅值的特征分量分离明显,出现了“槽状”频谱,如图 4(d)所示,原高幅值频谱近似削弱为 0,原低幅值频谱得到了显著增强。

采用多项式联合和分段调谐方法对自然图像频谱进行调谐的结果分别如图 3(e)和(f)所示,对心理物理学模板图像频谱进行调谐的结果分别如图 4(e)和(f)所示。通过调整调谐参数 α, β, γ 可得到针对性较强的频谱图。图 3(e)为自然图像的多项式联合调谐图,冗余特征的调谐幅度值较小,而原稀有特征的幅度值得到了保持,调谐结果中仍保持明显的中心突出。图 3(f)的多项式分段调谐使原高幅值区域幅值明显削弱,消除了这种中心突出性。图 4(e)为心理物理学模板图像的多项式联合调谐图,由于调谐参数比较大,原频谱中的高幅值区域变为了低幅值区域,低幅值区域变为了高幅值区域。图 4(f)的多项式分段调谐也出现了指数调谐中出现的“槽”结构,压制了冗余特征,进而突出了稀有特征。多项式调谐的结果比指数调谐的结果粗糙,但鲁棒性和适应性更好。

4 实验结果与分析

为了评估本文方法的性能,我们采用文献[4,10]的图像进行了实验,并与 Itti 经典模型、Hou 的谱残余算法、Guo 的相位谱算法、Yu 的脉冲余弦变换方法进行了性能对比。实验在 Intel XEON 6700 双核处理器,2G 内存的硬件环境下进行,操作系统为 Microsoft Windows XP Service Pack 2,实验开发环境是 Matlab R2009a。

实验图像分为心理物理学模板和自然图像两类,其中图 5 和图 6 为心理物理学模板图像,图 7 和图 8 为自然图像。为降低运算量,本文在进行傅里叶变换之前,对原图像进行亚采样处理,把原图像缩小为 64×64 大小的灰度图。

在图 5—图 8 中,图(a)都为原图像,图(b)为采用 Itti 算法的显著图,图(c)为采用 Hou 的谱残余算法的显著图,图(d)为采用 Guo 的相位谱算法的显著图,图(e)为采用 Yu 的脉冲余弦变换方法的显著图,图(f)至图(i)分别为采用本文提出的指数联合调谐、指数分段调谐、多项式分段调谐及多项式联合调谐方法得到的显著图。

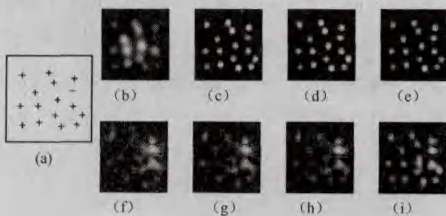


图 5 心理物理学模板图像示例(一)

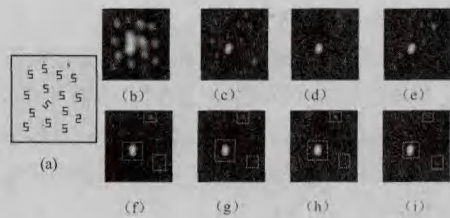


图 6 心理物理学模板图像示例(二)

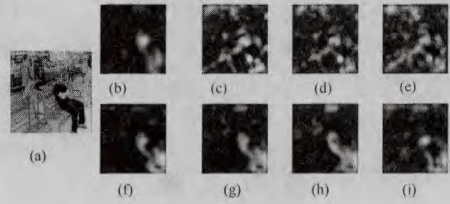


图 7 自然图像示例(一)

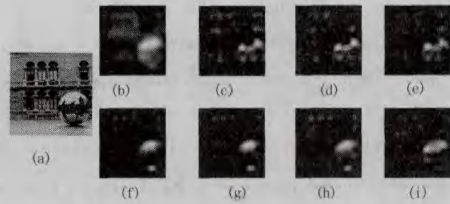


图 8 自然图像示例(二)

4.1 心理物理学模板图像实验结果

心理物理学模板图像是常用的评价显著性检测算法性能的图像。图 5(a)中的显著区域为右上角的“减号”,无论是 Itti 模型还是已有的 3 种基于频域的检测模型都没有检测出该显著特征,而本文方法在抑制冗余特征频谱的同时对显著特征频谱进行增强,从而可以有效检测出视觉显著区域。因此,本文的 4 种方法都检测出了该显著特征,其中以指数调谐和多项式调谐方法的效果最为明显,具体如图 5(f)、(g)、(h)和(i)中方框区域所示。

图 6 中,Itti 模型和其它 3 种基于频域的检测方法仅能够检测到中间的斜“5”,无法检测到右上角的小“5”和右下角的“2”。其中,Itti 模型的检测效果最差,显著区域很模糊,无法正确指示位置。而本文提出的 4 种方法不但可以有效检测到 3 个显著区域,而且削弱了其它冗余特征,增强了显著区域的对比度,表现出良好的检测效果,具体见图 6(f)、(g)、(h)和(i)中方框区域。

4.2 自然图像实验结果

图 7 和图 8 是对自然图像的检测效果的对比图。对于自然图像中的显著区域,本文提出的 4 种方法都能够有效检测出来,而且检测效果优于其它的显著性检测算法。与 Hou 等人的基于频域的显著性检测方法仅能给出显著区域大致位置相比,指数调谐方法和多项式分段调谐方法由于对显著特征和冗余特征的区分度较明显,可以有效提取显著区域形状,如图 7 中坐在椅子上的人的腿部轮廓和图 8 中的圆球状物体。与 Itti 模型检测结果相比,本文方法检测出来的显著区域对比度高且轮廓明显,而且在运算量方面也具有较大优势。

结束语 本文提出了基于人类视觉的侧抑制机制进行频域幅度谱调谐的显著性检测方法。该方法分析图像频域的幅度谱特征,在人类视觉的侧抑制机制基础上,通过对频域幅度谱进行非线性调谐,达到抑制冗余特征和突出显著特征的目的。

的, 进而提高显著区域的检测效果。

实验结果表明, 与传统的基于频域的显著性检测方法相比, 本文方法不但能够有效检测出显著区域, 而且可以较好地保留显著区域轮廓, 检测结果稳定, 鲁棒性强; 与基于空域的Itti显著性模型相比, 本文方法检测出来的显著区域对比度高, 显著区域轮廓明显, 且运算量小。

本文对彩色图像的处理是基于亚采样灰度图进行的, 亚采样本身损失了很多信息, 这对检测效果有一定的影响。后续研究中, 我们将对图像的颜色特征分量进行研究, 将灰度和颜色的频谱信息进行融合。同时, 还将在多尺度、空频域融合等方面进行扩展研究。

参考文献

- [1] Treisman A M, Gelade C. A feature integration theory of attention[J]. *Cognitive Psychology*, 1980, 12: 97-136
- [2] Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry[J]. *Human Neurobiology*, 1985, 4(4): 219-227
- [3] Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254-1259

(上接第 241 页)

对被迁移的数据块间相关性、数据块大小及准确定位做进一步的研究。

参考文献

- [1] Lyman P, Varian H R, Swearingen K, et al. How much information [EB/OL]. <http://www.sims.berkeley.edu/research/projects/how-much-info-2003/>, October 2003
- [2] Chen Ying. Information Valuation for Information Lifecycle management[C]// *Proceeding of the 2nd International Conference on Autonomic Computing*. Washington, DC: IEEE Computer Society, June 2005: 135-146
- [3] Public Law 104-191. Health insurance portability and accountability act [EB/OL]. <http://aspe.hhs.gov/adnsimp/pl104191.htm>, August 1996
- [4] Public Law 107-204. Sarbanes-Oxley, An Act [EB/OL]. <http://corporate.findlaw.com/industry/corporate/docs/pub107.204.pdf>, July 2002
- [5] DOD 5012.2-STD. Design criteria standard for electronic records management software applications[R]. Assistant Secretary of Defense for Command, Control, Communications, and Intelligence, June 2002
- [6] Chen Ying. Information Valuation for Information Lifecycle Management[R]. Storage Systems Department, IBM Almaden Research Center
- [7] Johnson C. ILM Case Study: Complete Data Lifecycle Management Solution [EB/OL]. http://www.snia.org/tech_activities/dmf/ILM_Solutions_Conference/2004/Agenda/Mustang, Octo-

- [4] Hou X, Zhang L. Saliency Detection: A Spectral Residual Approach[C]// *Proc. CVPR*. 2007
- [5] Guo C L, Ma Q, Zhang L M. Spatio-temporal Saliency Detection Using Phase Spectrum of Quaternion Fourier Transform[C]// *Proc. CVPR*. 2008
- [6] Yu Ying, Wang Bin, Zhang Li-ming. Selective Visual Attention Model Based on Pulsed Cosine Transform[J]. *PR&AI*, 2010, 23(10): 616-623
- [7] Li Zhao-ping. A Saliency Map in Primary Visual Cortex [J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2002, 6(1): 9-16
- [8] Allman J M, Miezin F, McGuinness E. Stimulus Specific responses from beyond the classical receptive field: neurophysiological mechanisms for local-global comparisons in visual neurons[J]. *Annu Rev Neurosci*, 1985, 8: 407-430
- [9] Wolfe J. Guided Search 2.0: A Revised Model of Guided Search [J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1994, 1(2): 202-238
- [10] Bruce N D B, Tsotsos J K. Saliency, Attention, and Visual Search: An Information Theoretic Approach[J]. *Journal of Vision*, 2009, 9(3): 1-24
- [11] Ruderman D. The Statistics of Natural Images. *Network [J]. Computation in Neural Systems*, 1994, 5(4): 517-548

ber 2004

- [8] Pierre E. Introduction to ILM: A Tutorial [EB/OL]. http://www.snia.org/tech_activities/dmf/ILMSolutionsConference/2004/Agenda/IntroductionILM, October 2004
- [9] Ganger G R, John D S, Klosterman A J. Self- * Storage Brick-based Storage with Automated Administration [R]. CMU-CS-03-178. Carnegie Mellon University, August 2003
- [10] Mesnier M, Thereska E, Ganger G R, et al. File classification in self- * storage systems [C]// *Proceedings of the First International Conference on Autonomic Computing (ICAC-04)*. New York, NY, May 2004
- [11] Page L, Brin S, Motwani R, et al. The pagerank citation ranking, Bringing order to the Web [EB/OL]. <http://dbpubs.stanford.edu/8090/pub/1999-66>, 1999
- [12] Ridings C, Shishigin M. PageRank Uncovered [EB/OL]. <http://www.voelspriet2.nl/PageRank.pdf>, 2002
- [13] Denning P J. The working set model for program behavior [J]. *Communications of the ACM*, 1968, 11(5)
- [14] Denning P J. Working sets past and present [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1980, SE-6(1): 64-84
- [15] Effelsberg W, Haerder T. Principles of database buffer management [J]. *ACM Transactions on Database Systems*, 1984, 9(4)
- [16] Zhou Xiong-mu, Hai Jin, Song Wu. Information Lifecycle Management in Multi-gird Environment [C]// *第十四届全国信息存储技术学术会议*. 北京: 电子工业出版社, 2006: 175-184
- [17] 赵晓南, 曾雷杰, 李战怀. 一种基于块级的存储性能优化方法 [J]. *计算机科学*, 2009, 36(6): 130